DOI:10.11931/guihaia.gxzw201905047

施肥与刈割对内蒙古草地生态化学计量特征的影响

陈安群，轩娟，王冬，刘银占*

（河南大学生命科学学院，河南 开封，475004）

摘要：为了明确施肥和刈割对蒙古半干旱草地四种植物化学计量特征的影响。2014 年 8 月以内蒙古半干旱草地的四种植物冷蒿（*Artimesia frigida*）、菊叶委陵菜（*Potentilla tanacetifolia*）、羊草（*Aneurotepidimu chinense*）、扁蓿豆（*Melissitus ruthenica*）为主要研究对象，利用方差分析及多重比较分析对照、施氮肥、割草、割草和施氮肥处理下的植物碳、氮、磷含量的差异以及不同处理下碳氮比和氮磷比的变化。结果表明施氮肥与割草均未影响植物碳含量。施氮肥显著提高了植物氮含量（$P < 0.05$），进而降低了碳氮比（$P < 0.05$），提高了氮磷比（$P < 0.05$）。割草处理后扁蓿豆的氮含量显著提高了 0.18% ($P < 0.05$)，羊草的氮含量显著降低了 0.13% ($P < 0.05$)，冷蒿与菊叶委陵菜的氮含量无显著变化。割草显著提高了冷蒿和菊叶委陵菜的磷含量（$P < 0.05$），但是未影响羊草和扁蓿豆的磷含量。本研究证实了氮添加或割草会影响部分草地物种的化学计量特征，但是氮添加或割草对植物化学计量特征的影响存在种间差异。本研究结果可以为半干旱草地植物功能性状的研究提供部分数据支持。

关键词：氮沉降，刈割，碳氮比，氮磷比

中图分类号：S511　　　**文献标识码**：A

Effect of fertilization and mowing on ecological stoichiometry characteristics in an Inner-Mongolian steppe

CHEN Anqun, XUAN Juan, WANG Dong, LIU Yinzhan*

(*School of Life Sciences*, *Henan University*, Kaifeng 475004, Henan, China)

Abstract: In order to detect the effect of fertilization and mowing on stoichiometry characteristics of four plant species in an semi-arid steppe in Inner-Mongolia. Four plant species including *Artemisia frigida*, *Potentilla tanacetifolia*, *Leymus chinensis*, and *Melissitus ruthenica* in the steppe were collected in August 2014. Contents of carbon, nitrogen and phosphorus, and ratios of C:N, C:P and N:P in different plants in field experiment under nitrogen fertilization and mowing treatment were investigated. The effect of nitrogen fertilization and mowing on carbon, nitrogen and phosphorus, and ratios of C:N, C:P and N:P were analyzed with ANOVAs. The differences of stoichiometry characteristics under different treatments were analyzed with Post-Hoc tests. The results indicate that neither nitrogen fertilization nor mowing alter carbon content in the steppe. Nitrogen fertilization significantly elevated the plant nitrogen content ($P < 0.05$), thus decreased the C:N ratio ($P < 0.05$) and increased the N:P ratio ($P < 0.05$). Mowing increased the nitrogen content of *M. ruthenica* by 0.18% ($P < 0.05$), decreased the nitrogen content of *L. chinensis* by 0.13% ($P < 0.05$), but did not affect the nitrogen content of *A. frigida* or *P. tanacetifolia*. Mowing significantly elevated the phosphorus content of *Artemisia frigida* and *Potentilla tanacetifolia* ($P <$ 0.05), but did not affect the phosphorus content of *M. ruthenica* or *L. chinensis*. The study has

基金项目：国家自然科学基金（31670477，31600380）[Supported by the National Natural Science Foundation of China (31670477，31600380)]。

作者简介：陈安群 (1981-)， 女，山东省沂源县人，实验师，硕士，研究方向为化学计量学，全球变化生态学，（E-mail）chenanqun03@163.com。

***通信作者**：刘银占，博士，副教授，研究方向为植物生态学，（E-mail）liuyinzhan.1@163.com。

approved that nitrogen fertilization and mowing can affect the plant stoichiometry characteristics in the steppe, but the affect varied with species. The results can provide data support for the study on plant functional traits in the grassland.

Key Words: nitrogen deposition, mowing, C∶N ratio, N∶P ratio

生态化学计量学综合化学计量学与生态学的基本理论，是研究生态系统能量平衡和多种化学元素(通常是 C 、N 、P 、O 、S)平衡的一门科学（曾德慧和陈广生, 2004；贺金生和韩兴国, 2010）。以植物碳、氮、磷含量，以及碳氮比和氮磷比为主要指标的植物化学计量特征是植物最为重要的功能性状之一（Leal et al., 2016），在生态系统养分利用、养分重吸收、以及元素循环研究中具有重要作用（王绍强和于贵瑞, 2008; Yan et al., 2015）。C:N:P 与凋落物分解、氮固定、植物-食草动物-肉食动物间取食关系、生态系统物种组成、生物体对环境的胁迫等重要的生态系统过程密切相关（Sardans et al., 2012）。碳、氮、磷是植物生长密切相关的三种主要元素，植物对环境变化的响应经常体现在这三种元素相关的化学计量特征的变化上。很多研究证实环境变化包括气候变暖、降水格局变化、大气氮沉降等都会影响植物的碳氮磷化学计量特征（Elser et al., 2009; Van de Waal et al., 2010; Bai et al., 2012; 严正兵等, 2013），进而导致生态系统结构和功能的变化。有研究表明环境变化引起的生产者 C:N 和 C:P 变化，进而通过食物网改变消费者的 C:N 和 C:P；N:P 的变化会改变依赖本身生长速率优势的物种的竞争力发生变化;这些变化将最终改变生态系统群落组成及物质循环和能量流动（Elser & Hamilton, 2007）。因此，研究生物化学计量特征对于环境变化的响应，具有非常重要的理论和现实意义。

自工业革命以来，由于化石燃料的燃烧和化肥的大量使用，大气氮沉降成为最为主要的环境问题之一，其中我国是世界范围内大气氮沉降最为严重的三大地区之一（Liu et al., 2013）。氮素是植物主要的营养元素之一，大量研究表明大气氮沉降会刺激植物生长（Xia & Wan, 2008; 苏富源等, 2015; 孙佳林等, 2015），改变植物物候（Liu et al., 2017），改变植物群落结构（Liu et al., 2018）。秋季割草，禁牧舍饲是我国上世纪末以来主要的草地管理方式之一（张曙光, 2009）。割草同样会对植物生长（薛睿等, 2010），植物物候（Liu et al., 2017），群落结构（Liu et al., 2018）产生一系列重要的影响。以上过程均与植物化学计量特征密切相关，开展氮沉降与割草背景下植物化学计量特征变化的研究将有助于更好地解释草地生态系统过程对大气氮沉降和草地利用方式的响应。

内蒙古草地是我国最为主要的草地生态系统之一，也是我国最为重要的畜产品供应基地和生态屏障。在此地区开展生态学研究对于维护该地区草地的群落结构与生态系统功能，保证草地生态可持续发展具有重要意义。因此在该地区多伦县自 2012 年起建立了一项关于模拟氮沉降（氮添加）和割草的实验平台，通过测定不同处理下植物的化学计量特征，研究氮添加、割草及其交互作用对该地区不同植物化学计量特征的影响。

1 材料与方法

1.1 研究地介绍

实验地位于内蒙古自治区锡林郭勒盟多伦县中国科学院植物研究所十三里滩恢复实验站（42°02′ N, 116°17′ E, 1324 m a. s. l.），该地区属温带大陆性气候，年平均气温为 2.3 °C，年均降水量约为 380 mm。植被类型为温带半干旱草地，优势物种为冷蒿（*Artimesia frigida*），建群种有菊叶委陵菜（*Potentilla tanacetifolia*）、羊草（*Aneurotepidimu chinense*）、扁蓿豆（*Melissitus ruthenica*）等，另有阿尔泰狗娃花（*Heteropappus altaicus*）、糙隐子草（*Cleistogenes squarrosa*）、猪毛菜（*Salsola pellucida*）、克氏针茅（*Stipa krylovii*）等。

1.2 实验设计

本研究采用三因素实验设计，包括施肥和刈割两种非生物因素和植物物种这一生物因

素。施肥包括施肥（10 g N m^{-2}）和不施肥两水平；刈割包括秋季刈割和全年不刈割两个水平。共包括 4 种环境处理：对照、施肥、刈割、施肥与刈割同时处理。每种处理 5 个重复，共 20 个样方随机排列。每个样方大小为 3 m × 3 m。相邻两个样方间隔 2 m。具体实验处理如下：

刈割处理：参照当地秋季打草的留茬高度和该地区已经运行多年的成熟实验，每年 8 月下旬将刈割样方中地上 3 cm 以上的植物体全部割掉，并移出样方。全年不刈割样方不作处理。

施肥处理：参照本地区已开展实验（Liu et al., 2018）的处理方式。在施肥样方中每年六月中旬和七月中旬分别按照 5 g N m^{-2} 的标准采用喷雾的方式施加 NH_4NO_3，不施肥样方中喷入等量的水以抵消添加氮素时加入的水分的影响。

植物物种：2014 年 8 月上旬，在每个样地随机选取 1 个 1 m × 1 m 的样方，进行群落调查。然后按照以下原则进行物种选择：（1）在 20 个样方均出现，（2）在每个样方内的总生物量不少于 1 g，按照这一原则，确定冷蒿（*A. frigida*）、菊叶委陵菜（*P. tanacetifolia*）、羊草（*A. chinense*）、扁蓿豆（*M. ruthenica*）四种植物为研究对象。

1.3 参数监测

以上四种植物在确定为实验对象后，每种植物每个样方收集 5～10 g 鲜重的地上部分，在烘箱内 105 ℃ 杀青 3 h 后，65 ℃ 烘干 48 h 至恒重记为一份样品。每份样品采用 Retsch MM400 混合球磨仪（德国莱驰公司）研磨，过 0.1 mm 筛备用。参照以前的研究中描述的分析方法（Li et al., 2017），对碳、氮、磷含量及相关指标进行测定和计算。

碳、氮含量的测定：称取 20 mg 研磨过筛后样品，用专用铝箔包好，使用 vario Macro CNS 半常量元素分析仪（德国艾利蒙塔公司）采用燃烧法测定样品中的碳、氮含量。

磷含量的测定：（1）每份样品称取 0.2 g，置于 SH220N/SH220F 石墨消解仪（海能仪器）专属消解管中，用少量去离子水润湿，再加入浓硫酸 5 mL 摇匀，置入消解仪中 370 ℃消解，期间将消解管取出冷却加 2-3 次过氧化氢，每次滴加 5-10 滴。消解冷却后，转移消解液至 50 mL 容量瓶中并冷却定容，澄清或过滤后待测。同时消解前另取一支空消解管，除不加样品外，其它步骤和药品重复上述操作，作为空白对照。（2）稀释消解液 10 倍后，采用 SmartChem 200（意大利 AMS Systea 公司）全自动化学分析仪利用比色法院里分析样品中的磷含量。

碳氮比与氮磷比分别按照如下公式计算：碳氮比 = 碳含量/氮含量；氮磷比 = 氮含量/磷含量。

1.4 数据分析

采用三因素方差分析分析物种、施肥、刈割及其交互作用对植物碳、氮、磷含量，以及碳氮比和氮磷比的影响。采用双因素方差分析分析施肥、刈割及其交互作用对每个物种碳、氮、磷含量，以及碳氮比和氮磷比的影响。采用相关矩阵分析植物不同化学计量指标之间的相关性。以上分析采用 SPSS 19.0（纽约 IBM 公司）完成。

2 研究结果

2.1 刈割和施肥对不同植物碳含量的影响

三因素方差分析结果表明：不同物种间碳含量存在显著差异（表 1，图 1）。四个物种的碳含量排序为羊草 > 冷蒿 > 扁蓿豆 > 菊叶委陵菜（图 1）。但无论是综合所有物种还是每一具体物种，施肥和刈割对植物碳含量的影响均不显著（图 1）。物种、施肥和刈割对植物碳含量无交互影响（表 1，图 1）。

表 1 施肥、刈割对不同物种化学计量特征影响的方差分析结果（*P* 值）

Table 1 Results for ANOVAs on the effect of fertilization, mowing, and species on stoichiometry characteristics for different species

处理 Source	自由度 Degree of freedom	碳含量 Carbon content	氮含量 Nitrogen content	磷含量 Phosphorus content	碳氮比 C:N ratio	氮磷比 N:P ratio
物种 Species	3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
刈割 Mowing	1	0.805	0.712	0.053	0.074	0.392
施肥 Fertilization	1	0.324	0.000	0.228	0.000	0.000
物种×刈割 Species×Mowing	3	0.732	0.000	0.006	0.000	0.000
物种×施肥 Species×Fertilization	3	0.104	0.000	0.000	0.000	0.001
刈割×施肥 Mowing×Fertilization	1	0.340	0.000	0.598	0.000	0.792
物种*刈割*施肥 Species× Mowing×Fertilization	3	0.916	0.069	0.000	0.038	0.000
冷蒿 *A. frigida*						
刈割 Mowing	1	0.549	0.273	0.005	0.450	0.272
施肥 Fertilization	1	0.145	0.000	0.000	0.000	0.000
刈割×施肥 Mowing×Fertilization	1	0.620	0.018	0.026	0.001	0.004
菊叶委陵菜 *P. tanacetifolia*						
刈割 Mowing	1	0.560	0.067	0.015	0.002	0.005
施肥 Fertilization	1	0.214	0.000	0.001	0.000	0.000
刈割×施肥 Mowing×Fertilization	1	0.769	0.000	0.826	0.000	0.290
羊草 *A. chinense*						
刈割 Mowing	1	0.668	0.017	0.353	0.004	0.093
施肥 Fertilization	1	0.708	0.000	0.157	0.000	0.000
刈割×施肥 Mowing×Fertilization	1	0.148	0.566	0.006	0.116	0.014
扁蓿豆 *M. ruthenica*						
刈割 Mowing	1	0.649	0.013	0.163	0.027	0.052
施肥 Fertilization	1	0.455	0.000	0.949	0.000	0.124
刈割×施肥 Mowing×Fertilization	1	0.991	0.010	0.001	0.023	0.006

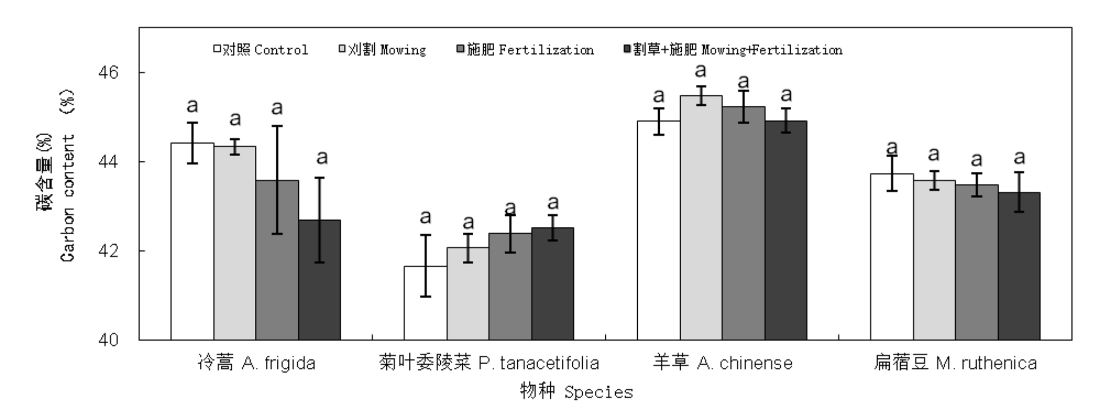


图 1 不同处理下的植物碳含量均值（±标准误差）

注：不同字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平上显著。下同。

Note：Different letters represents significant difference at $P < 0.05$. The same below.

Fig. 1 Mean values (±SE) of plant carbon content under different treatment

2. 2 刈割和施肥对不同植物氮含量的影响

三因素方差分析结果表明：不同物种间氮含量存在显著差异（表 1，图 2）。四个物种的氮含量排序为扁蓿豆 ＞ 羊草 ＞ 冷蒿 ＞ 菊叶委陵菜（图 2）。施肥显著提高了植物氮含量，但是提高幅度因物种而异（表 1，图 2）。施肥处理下冷蒿、菊叶委陵菜、羊草和扁蓿豆的氮含量分别提高了 0.76%、0.37%、0.50%和 0.31%（图 2）。施肥和刈割对植物氮含量存在显著的交互影响（表 1）。刈割样方中施肥对植物氮含量的促进作用要高于不刈割样方中施肥对植物氮含量的影响（图 2）。总体上刈割对植物氮含量无显著影响（表 1，图 2），但是刈割对不同物种氮含量的影响存在显著差异（表 1），刈割处理后扁蓿豆的氮含量显著提高了 0.18%，羊草的氮含量显著降低了 0.13%，冷蒿和菊叶委陵菜的氮含量无显著变化（图 2）。

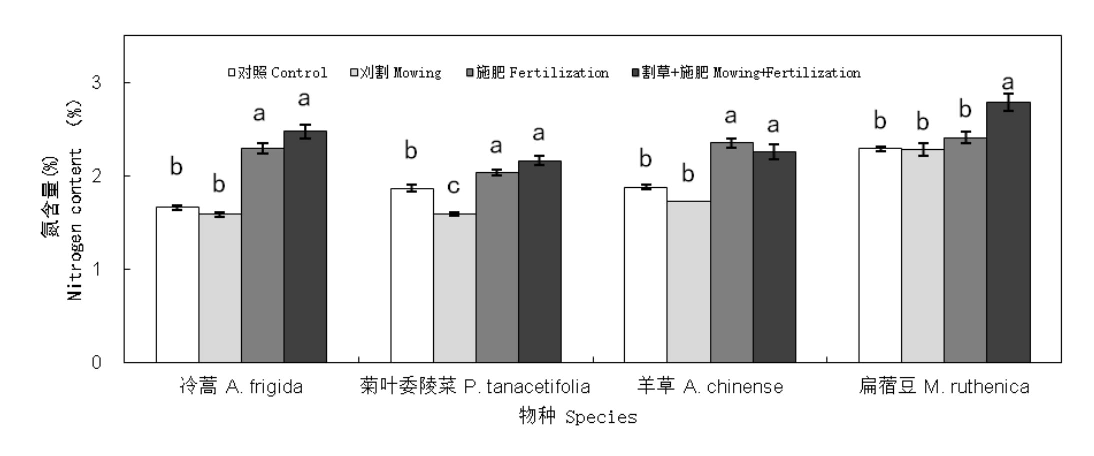


图 2 不同处理下的植物氮含量均值（±标准误差）

Fig. 2 Mean values (±SE) of plant nitrogen content under different treatment

2. 3 刈割和施肥对不同植物磷含量的影响

三因素方差分析结果表明：不同物种间磷含量存在显著差异（表 1，图 3）。冷蒿的磷含量显著高于其它几个物种（图 3）。总体上施肥对植物磷含量没有显著影响（表 1）。但是对于特定物种，施肥显著改变了植物磷含量。比如施肥处理下冷蒿的磷含量显著增加了

0.14%，菊叶委陵菜的磷含量显著降低了 0.07%（图 3）。刈割对植物磷含量的影响达到边际显著水平（表 1，图 3）。但是不同物种的植物磷含量对刈割的响应不同（表 1），刈割显著提高了冷蒿和菊叶委陵菜的磷含量，但是对羊草和扁蓿豆的磷含量没有显著影响（表 1，图 3）。

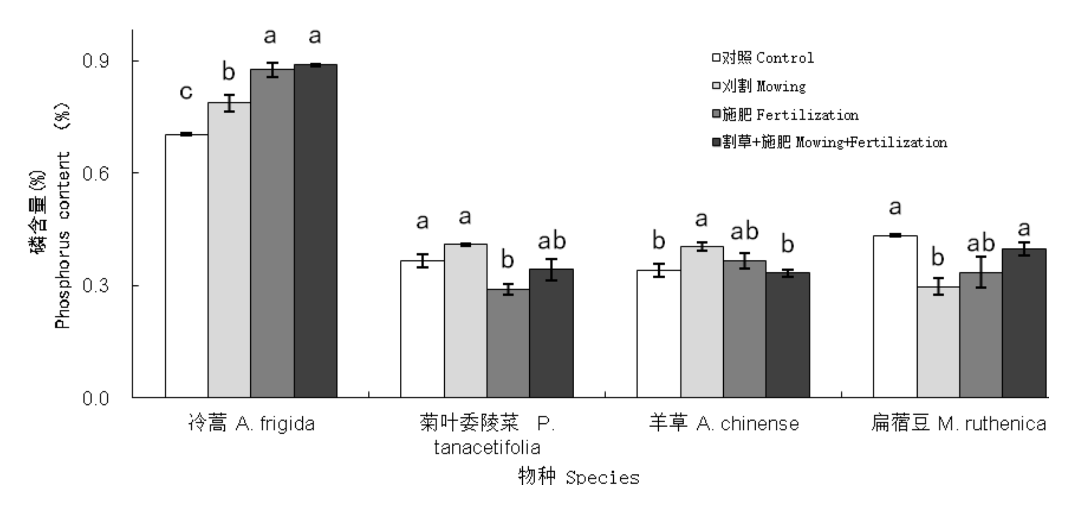


图 3 不同处理下的植物磷含量均值（±标准误差）

Fig. 3 Mean values (±SE) of plant phosphorus content under different treatment

2. 4 刈割和施肥对不同植物碳氮比的影响

三因素方差分析结果表明：不同物种间碳氮比存在显著差异（表 1，图 4）。四种受试植物中，冷蒿的碳氮比最高，扁蓿豆的碳氮比最低（图 4）。施肥显著降低了植物的碳氮比（表 1，图 4）。但施肥对不同物种碳氮比的效应存在显著差异（表 1，图 4）。施肥处理下冷蒿、菊叶委陵菜、羊草和扁蓿豆的碳氮比分别降低了 9.25、4.09、5.53 和 2.29（表 1，图 4）。刈割和施肥对碳氮比存在显著的交互影响（表 1）。施肥引起的碳氮比的下降程度在刈割处理下比不刈割处理下高得多（表 1，图 4）。刈割对植物碳氮比的影响达到接近显著水平（表 1，图 4）。不同植物碳氮比对刈割的响应不同（表 1，图 4）。刈割显著提高了菊叶委陵菜和羊草的碳氮比，降低了扁蓿豆的碳氮比，对冷蒿的碳氮比没有显著影响（表 1，图 4）。

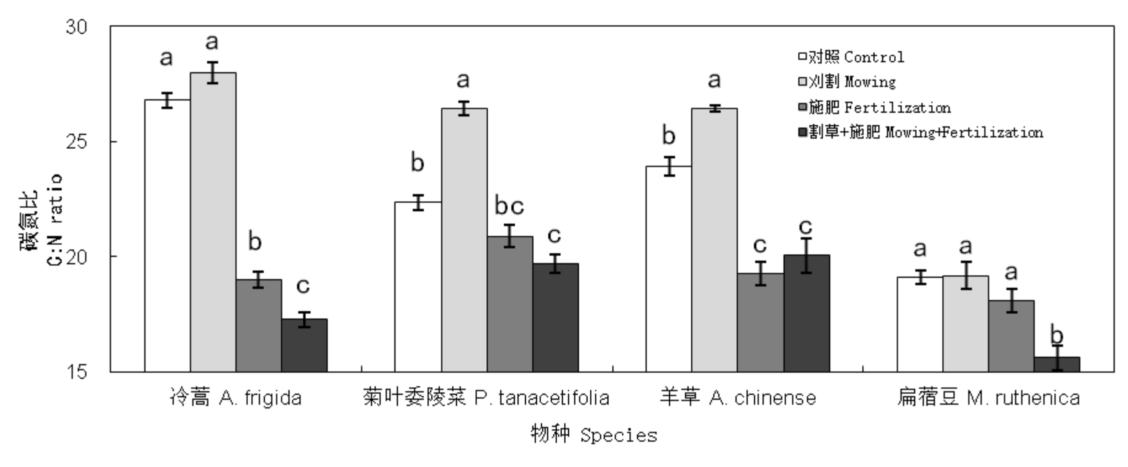


图 4 不同处理下的植物碳氮比均值（±标准误差）

Fig. 4 Mean values (±SE) of C:N ratio under different treatment

2.5 刈割和施肥对不同植物氮磷比的影响

与其它指标类似，不同物种间氮磷比存在显著差异（表 1，图 5）。四种受试植物中扁蓿豆的氮磷比最大，冷蒿的氮磷比最小（图 5）。施肥显著提高了受试植物的氮磷比，但是对不同物种的提高幅度不一样，其中菊叶委陵菜氮磷比的提高幅度最大，冷蒿氮磷比的提高幅度最小（图 5）。刈割总体上对氮磷比没有显著影响，但是显著降低了菊叶委陵菜的氮磷比（图 5），接近显著地降低了羊草的氮磷比（图 5），提高了扁蓿豆的氮磷比（图 5）。

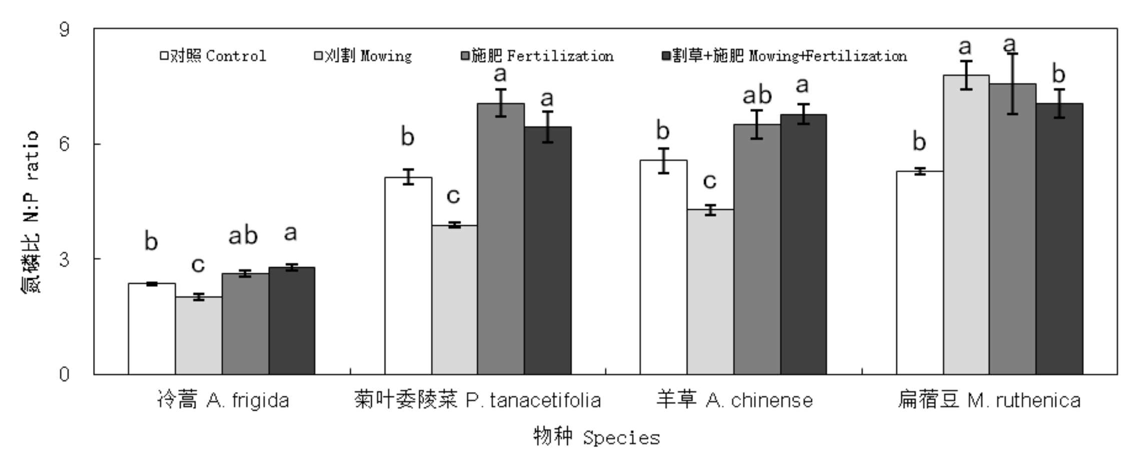


图 5 不同处理下的植物氮磷比均值（±标准误差）

Fig. 5 Mean values (±SE) of N:P ratio under different treatment

2.6 植物化学计量特征之间的关系

综合所有样本，植物氮碳比与氮含量之间呈显著的负相关关系（表 2）；植物氮磷比与氮含量之间呈显著的正相关关系，与磷含量呈显著的负相关关系（表 2）；植物碳氮比与氮磷比之间存在显著的负相关关系（表 2）。除以上关系外，两个不同化学计量特征之间的相关性均不显著（表 2）。

表 2 植物化学计量特征之间的相关矩阵

Table 2 Correlation matrix among different stoichiometry characteristics

	氮含量 Nitrogen content	碳含量 Carbon content	磷含量 Phosphorus content	碳氮比 C:N ratio
碳含量 Carbon content	-0.005 (0.966)			
磷含量 Phosphorus content	-0.071 (0.531)	0.027 (0.815)		
碳氮比 C:N ratio	-0.963 (<0.001)	0.212 (0.059)	0.127 (0.263)	
氮磷比 N:P ratio	0.490 (<0.001)	-0.04 (0.727)	-0.856 (<0.001)	-0.530 (<0.001)

注：表格中每一组数字为两个参数间 r 值（*P* 值）

Note: Each data in the table is the r value (P value) between two parameters

3 讨论

3.1 施肥对半干旱草地化学计量特征的影响

在本研究中，施肥显著提高了植物的氮含量，这一结果与大部分前期研究的结果一致（羊留冬等, 2012; 严正兵等, 2013; 宾振钧等, 2014; 宋彦涛等, 2016）。一方面，施肥会缓解该地区植物生长的氮限制（Lü et al., 2012a; Liu et al., 2018）促进植物对土壤氮的吸收，进而提高植物氮含量。另一方面施肥会提高植物氮的重吸收速率（Lü et al., 2012a），进而提高植

物氮含量。与前期研究不同的是，本研究中不同物种磷含量对施肥的响应趋势不同，最终导致磷元素对施肥的响应不显著。造成这一结果的主要原因可能是因为本地区植物生长基本不受磷元素限制（Yang et al., 2014），因此植物生长过程中施肥对磷吸收的刺激作用可能比其他研究要弱很多。施肥处理下升高的氮含量和不变的碳、磷含量最终导致碳氮比的降低和氮磷比的提高。由于碳氮比和氮磷比是凋落物分解密切相关的两个指标（d'Annunzio et al., 2008; Güsewell & Gessner, 2009），施肥处理下这两个指标的变化暗示着施肥处理下该地区的凋落物分解以及与此密切相关的生态系统碳循环过程均会发生显著变化。施肥在本研究中对冷蒿和羊草的氮含量提高幅度更大，说明未来氮沉降背景下这两个物种对氮素的利用效率高于其它两个物种，在未来大气氮沉降速率增加的情况下，其优势度可能会越来越高。冷蒿是当地家畜所采食的最主要物种，羊草是当地最为优质的牧草之一，所以大气氮沉降速率增加对本地畜牧业来说，是存在积极作用的，这与前期的关于氮沉降对草地鼠害、生物多样性等参数负面影响的研究不同（Xia & Wan, 2008; Liu et al., 2018），因此关于大气氮沉降速率增加对当地草地生态系统功能的评价，需要引入更多的参数，从更多的方面进行综合评价。

3.2 刈割对半干旱草地化学计量特征的影响

本研究发现总体来说，刈割对所有化学计量特征均未达到显著水平。这一结果与大部分研究的结论不同。前期研多数究表明刈割会导致植物体内因营养元素的再分配（杨惠敏等, 2013）,导致植物体内碳含量的上升（王正文, 2007）或降低（王国良等, 2007），以及氮、磷含量的变化（钟小仙等, 2005; Lü et al., 2012b）。这可能是因为本研究的刈割时间在生长季末期，虽然受试物种均为多年生植物，但是四种植物均主要靠地下芽和根系越冬，因此生长季末刈割对下一年植物生长的影响比传统刈割要小得多。尽管如此，刈割会改变土壤温湿度（于辉等, 2008; Liu et al., 2017）进而影响植物生长（Liu et al., 2017）。因此对于个别物种，刈割显著改变了其氮含量或者磷含量，进而改变了碳氮比和氮磷比。比如本研究中刈割提高了扁蓿豆的氮含量，进而提高了其碳氮比，降低了氮磷比。这一结果与于辉等（2008）的研究中肇东苜蓿对刈割的响应具有相同的趋势。可能原因是，刈割会提高土壤温度（Wan et al., 2002; Liu et al., 2017），高温条件下植物的秋季物候会推迟（Körner & Basler, 2010），在八月中旬取样时刈割处理样地中的扁蓿豆比对照样地衰老速度慢。氮元素主要存在于植物的幼嫩部分，因此刈割样地中的扁蓿豆氮元素含量显著高于对照样地。本研究发现刈割后施肥对植物氮含量的提高幅度更大，也就是说刈割可以促进植物的氮吸收。此外，刈割处理中少数物种在刈割后氮含量增加，这意味着刈割可以提高部分物种的营养物质含量，说明从牧草营养学的角度来讲，秋季刈割是当地草地非常理想的一种草地管理方式。

4 结论

刈割对不同植物化学计量特征的影响存在较大差异，无一致的趋势。刈割显著提高了扁蓿豆的氮含量，降低了羊草的氮含量。进而改变了其碳氮比和氮磷比。施肥提高了植物的氮含量，对植物碳含量和磷含量没有显著影响，显著降低了植物的碳氮比，提高了植物的氮磷比。研究结果表明本研究该地区植物化学计量特征对氮沉降的响应较为一致，但是关于刈割对植物化学计量特征的影响，由于其中间差异较大，需要对更多的物种进行研究，以便更好的总结不同物种或功能群的化学计量特征对刈割的响应规律。

参考文献：

BAI Y, WU J, CLARK CM, et al., 2012. Grazing alters ecosystem functioning and C:N:P stoichiometry of grasslands along a regional precipitation gradient[J]. J Appl Ecol, 49(6): 1204-1215.

BIN ZJ, WANG JJ, ZHANG WP, et al., 2014. Effects of N addition on ecological stoichiometric characteristics in six dominant plant species of alpine meadow on the Qinghai-Xizang Plateau,

China[J]. Chin J Plant Ecol, 38(3): 231-237. [宾振钧, 王静静, 张文鹏, 等, 2014. 氮肥添加对青藏高原高寒草甸6个群落优势种生态化学计量学特征的影响[J]. 植物生态学报, 38(3): 231-237.]

D'ANNUNZIO R, ZELLER B, NICOLAS M, DHOTE JF, SAINT-ANDRE L, 2008, Decomposition of European beech (*Fagus sylvatica*) litter: combining quality theory and N-15 labelling experiments. Soil Biol Biochem, 40: 322-333.

ELSER JJ, ANDERSEN T, BARON JS, et al., 2009. Shifts in lake N:P stoichiometry and nutrient limitation driven by atmospheric nitrogen deposition[J]. Science, 326(5954): 835-837.

ELSER JJ, HAMILTON A, 2007. Stoichiometry and the new biology-the future is now. PLoS Biol, 5: 1403-1405.

GÜSEWELL S, GESSNER MO, 2009, N:P ratios influence litter decomposition and colonization by fungi and bacteria in microcosms. Funct Ecol, 23: 211-219.

HE JS, HAN XG, 2010. Ecological stoichiometry: Searching for unifying principles from individuals to ecosystems[J]. Chin J Plant Ecol, 34(1): 2-6. [贺金生, 韩兴国, 2010. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. 植物生态学报, 34(1): 2-6.]

KÖRNER C, BASLER D, 2010. Phenology under global warming[J]. Science, 327(5972): 1461-1462.

LEAL MC, SEEHAUSEN O, MATTHEWS B, 2016. The ecology and evolution of stoichiometric phenotypes[J]. Trend Ecol Evol, 32(2): 108-117.

LI F, HU J, XIE Y, et al., 2018. Foliar stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in wetland sedge *Carex brevicuspis* along a small-scale elevation gradient[J]. Ecol Indic, 92: 322-329.

LIU X, ZHANG Y, HAN W, et al., 2013. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. Nature, 494(7438): 459-462.

LIU Y, MA G, ZAN Z, et al., 2018. Effects of nitrogen addition and mowing on rodent damage in an Inner Mongolian steppe[J]. Ecol Evol, 8(8): 3919-3926.

LIU Y, MIAO R, CHEN A, et al., 2017. Effects of nitrogen addition and mowing on reproductive phenology of three early-flowering forb species in a Tibetan alpine meadow[J]. Ecol Eng, 99: 119-125.

LÜ XT, KONG DL, PAN QM, et al., 2012a. Nitrogen and water availability interact to affect leaf stoichiometry in a semi-arid grassland[J]. Oecologia, 168(2): 301-310.

LÜ X T, LÜ F M, ZHOU L S, et al., 2012b. Stoichiometric response of dominant grasses to fire and mowing in a semi-arid grassland[J]. J Arid Environ, 78: 154-160.

SARDANS J, RIVASUBACH A, PEÑUELAS J, 2012. The C:N:P stoichiometry of organisms and ecosystems in a changing world: A review and perspectives[J]. Perspect Plant Ecol Evol Syst, 14(1): 33-47.

SONG YT, LI Q, WANG P, et al.,2016. Response of *Leymus chinensis* functional traits and aboveground biomass to nitrogen addition in Songnen grassland in northeast China[J]. Pratacult Sci, 33(7): 1383-1390. [宋彦涛, 李强, 王平, 等, 2016. 羊草功能性状和地上生物量对氮素添加的响应[J]. 草业科学, 33(7): 1383-1390.]

SU FY, HAO MD,GUO HH et al., 2015. Effects of Nitrogen Fertilizer on the Yield and Nutrition Absorption of Artificial *Leymus chinensis* Grassland[J]. Acta Agrect Sin, 23(4): 893-896. [苏富源, 郝明德, 郭慧慧, 等, 2015. 施用氮肥对人工羊草草地产量及养分吸收的影响[J]. 草地学报, 23(4): 893-896.]

SUN JL, ZHANG WC, ZHENG HX, et al., 2015. Changes of Growth Characteristics of Kentucky

bluegrass under Water-nitrogen Interaction[J]. Acta Agrect Sin, 23(6): 1226-1232. [孙佳林，张炜成，郑海霞，等, 2015. 水氮交互作用下草地早熟禾生长特性的变化[J].草地学报，23(6): 1226-1232.]

Van de Waal D B, Verschoor A M, Verspagen J M H, et al., 2010, Climate-driven changes in the ecological stoichiometry of aquatic ecosystems[J]. Front Ecol Environ, 8(3): 145-152.

WAN S, LUO Y, WALLACE LL, 2002. Changes in microclimate induced by experimental warming and clipping in tallgrass prairie[J]. Global Change Biol, 8(8): 754-768.

WANG GL, LI XL, WAN LQ, et al., 2007. Effect of Cutting Rate on Water-soluble Carbohydrate Contents and Rhizome Components of *Leymus chinensis*[J]. Chin J Grassl, 29(4): 74-80. [王国良，李向林，万里强，等, 2007. 刈割强度对羊草可溶性碳水化合物含量及根茎构件的影响[J]. 中国草地学报，29(4): 74-80.]

WANG SQ, YU GR, 2008. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Acta Ecol Sin, 28(8): 3937-3947. [王绍强，于贵瑞, 2008. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 28(8): 3937-3947.]

WANG ZW, 2007. Temporal variation of water-soluble carbohydrate in the rhizome clonal grass *leymus chinensis* in response to defoliation[J]. Chin J Plant Ecol, 31(4): 673-679. [王正文, 2007. 根茎克隆植物羊草体内可溶性碳水化合物的时间变异及其对去叶干扰的响应(英文)[J]. 植物生态学报, 31(4): 673-679.]

XIA J, WAN S, 2008. Global response patterns of terrestrial plant species to nitrogen addition[J]. New Phytol, 179(2): 428-439.

XUE R, ZHENG SX, BAI YF, 2010. Impacts of grazing intensity and management regimes on aboveground primary productivity and compensatory growth of grassland ecosystems in Inner Mongolia[J]. Biodiv Sci, 18(3): 300-311. [薛睿，郑淑霞，白永飞, 2010. 不同利用方式和载畜率对内蒙古典型草原群落初级生产力和植物补偿性生长的影响[J]. 生物多样性，18(3): 300-311.]

YAN T, LÜ X, YANG K, et al., 2015. Leaf nutrient dynamics and nutrient resorption: a comparison between larch plantations and adjacent secondary forests in Northeast, China[J]. J Plant Ecol, 9(2): 165-173.

YAN ZB, JIN NY, HAN TS, et al., 2013. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of Arabidopsis thaliana[J]. Chin J Plant Ecol, 37(6): 551-557. [严正兵，金南瑛，韩廷申，等, 2013. 氮磷施肥对拟南芥叶片碳氮磷化学计量特征的影响[J]. 植物生态学报, 37(6): 551-557.]

YANG G, LIU N, LU W, et al., 2014. The interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and soil phosphorus availability influences plant community productivity and ecosystem stability[J]. J Eco, 102(4): 1072-1082.

YANG HM, WANG ZN, JI CR, 2013. Research Progress in the Dynamics of Carbon and Nitrogen in Forages after Cutting and Grazing[J]. Chin J Grassl, 35(4): 102-109. [杨惠敏，王振南，吉春荣, 2013. 刈割和放牧后牧草碳氮动态研究进展[J].中国草地学报,35(4):102-109.]

YANG LD, WANG GX, YANG Y, et al., 2012. Responses of leaf functional traits and nitrogen and phosphorus stoichiometry in *Abies fabiri* seedlings in Gongga Mountain to simulated nitrogen deposition[J]. Chin J Ecol, 31(1): 44-50. [羊留冬，王根绪，杨阳，等, 2012. 峨眉冷杉幼苗叶片功能特征及其N、P化学计量比对模拟大气氮沉降的响应[J]. 生态学杂志，31(1): 44-50.]

YU H, LIU HQ, CUI GW, 2008. Changes in overwintering rate and main——root C/N Ratio in *Alfalfa Cultivars* at different cutting frequency[J]. Chin J Grassl, 30(4): 21-24. [于辉，刘惠青，

崔国文, 2008. 不同刈割频率下紫花苜蓿品种的越冬率与主根 C/N 比变化[J]. 中国草地学报, 30(4): 21-24.]

ZENG DH, CHEN GS, 2005. Ecological stoichiometry: a science to explore the complexity of living systems[J]. Acta Phytoecol Sinica, 29(6): 1007-1019. [曾德慧, 陈广生, 2005. 生态化学计量学:复杂生命系统奥秘的探索[J]. 植物生态学报, 29(6):1007-1019.]

ZHANG SG, 2009. The study of Inner Monglian semi-agricultural semi-pastoral areas the policy and effect of <Forbid breed to stallfeed>[D]. Huhhot: Inner Mongolia University. [张曙光, 2009. 内蒙古半农半牧区禁牧舍饲政策及其效应研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学.]

ZHONG XX, JIANG HD, CAO WS, et al., 2005. Effect of N fertilization level and defoliation date on Ca, P and Mg mineral concentration in *Hybrid Pennisetum* and their relationship to ruminant requirements[J]. Acta Agrect Sin, 14(5): 87-91. [钟小仙, 江海东, 曹卫星, 等, 2005. 施肥和刈割日期对杂交狼尾草钙、磷、镁含量的影响及其与家畜需要的关系[J]. 草业学报, 14(5): 87-91.]